

Penguat Kelas D tanpa Tapis untuk *Subwoofer*

Budihardja Murtianta

Pogram Studi Teknik Elektro,
Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer,
Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga
budihardja.murtianta@uksw.edu

Abstrak

Pada penelitian ini dirancang penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer* berdasarkan teori-teori dan perhitungan-perhitungan elektronika. Penguat kelas D tanpa tapis mempunyai rugi-rugi daya lebih kecil dan dimensi rangkaian lebih kecil daripada penguat kelas D tradisional. Penguat ini terdiri dari untai pembanding, pembangkit gelombang segitiga, dan penguat daya yang bekerja sebagai pensakelaran. *Subwoofer* mempunyai kemampuan menghasilkan gelombang suara yang sangat rendah dan membutuhkan daya penggerak cukup besar. Penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer* ini dirancang untuk mempunyai tanggapan frekuensi 20 Hz-200 Hz dengan daya ± 35 W dan mempunyai penguatan tegangan sebesar 15 kali pada beban 8 Ω . Hasil perancangan diukur dengan menggunakan *Circuit Maker*. Hasil pengukuran menunjukkan daya penguat sebesar 35,9 W saat arus masukan 1,7 A dan penguatan tegangan 14,9 kali pada masukan maksimal 2 V dan mampu menghasilkan gelombang suara 200 Hz ke bawah.

Kata kunci: tapis, *subwoofer*, kelas D, penguat

Abstract

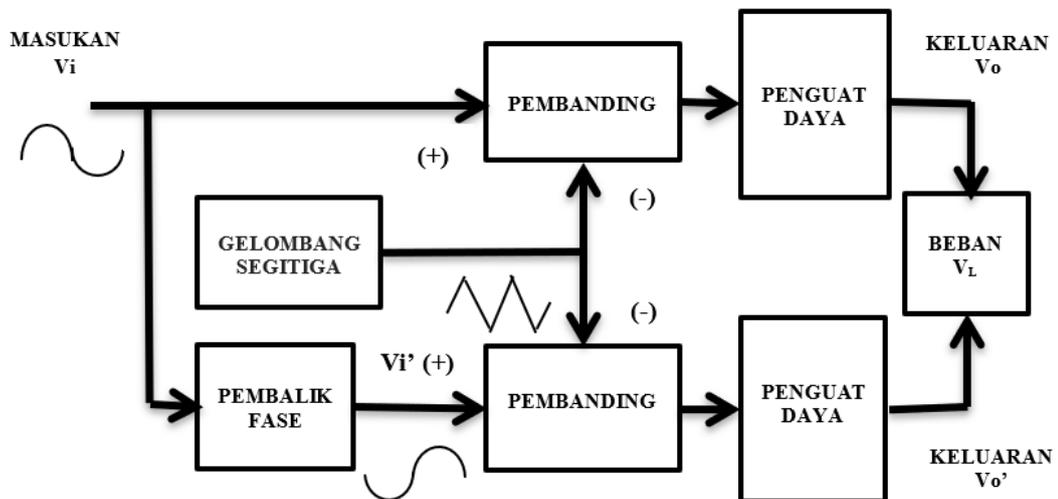
In this research, a filterless class D amplifier for subwoofer is designed based on electronic theories and calculations. The filterless class D amplifier has less power losses and smaller circuit dimensions than the traditional class D amplifier. This amplifier consists of a comparator, a triangular wave generator and power amplifier that works as a switch. Subwoofers have the ability to produce very low sound waves and require a large enough driving power. This filterless class D amplifier for subwoofer is designed to have a frequency response of 20 Hz-200 Hz with a power of ± 35 W and has a voltage gain of 15 times at 8 Ω load. The results of the design are measured using *Circuit Maker*. The measurement results show that the amplifier power 35.9 W when the input level 1.7 V and the voltage gain 14.9 times at the maximum input level of 2 V and is able to produce sound waves of 200 Hz down to DC.

Keywords: filter, subwoofer, D class, amplifier

1. Pendahuluan

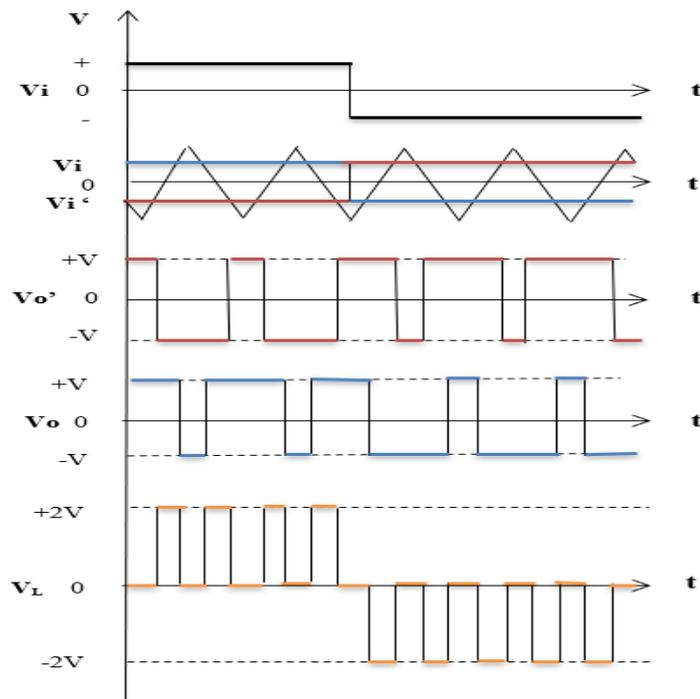
Penguat audio adalah piranti elektronik yang memperkuat sinyal audio berdaya rendah, seperti sinyal dari penerima radio atau pemutar CD, ke tingkat yang cukup tinggi untuk menggerakkan penyuar atau *headphone*. Tanggapan frekuensi penguat audio adalah 20 Hz hingga 20 kHz di mana pada umumnya terbagi dalam jangkauan frekuensi rendah (*bass*), menengah (*midrange*), dan tinggi (*treble*). Untuk jangkauan frekuensi rendah

kini berkembang menjadi *subwoofer* yang mempunyai kemampuan menghasilkan frekuensi rendah lebih baik daripada *bass*. *Subwoofer* mampu menghasilkan gelombang audio dengan frekuensi 200 Hz ke bawah [1]. Untuk menggerakkan *subwoofer* diperlukan daya relatif besar dibandingkan untuk menggerakkan *midrange* atau *tweeter*. Dengan demikian, selain mampu menghasilkan frekuensi rendah, penguat *subwoofer* juga harus mempunyai daya yang besar. Pada penelitian ini dirancang penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer*. Secara teori, efisiensi penguat kelas D adalah 100% pada semua aras keluaran. Dalam praktiknya, tentu saja hal tersebut tidak akan tercapai dan efisiensi antara 80% dan 90% [2]. Penguat kelas D mempunyai efisiensi tinggi karena prinsip kerja penguat daya seperti transistor atau MOSFET sebagai pensakelar hanya mengenal kondisi menghantar dan tak menghantar. Saat penguat daya menghantar arus yang mengalir besar dan tegangannya mendekati nol, sebaliknya saat penguat daya tak menghantar besar arus yang mengalir mendekati nol dan tegangannya besar. Pada kedua kondisi tersebut disipasi dayanya mendekati nol. Penguat jembatan kelas D tradisional mempunyai ayunan tegangan pada keluaran selisih sebesar $2\times$ tegangan catunya sedangkan penguat kelas D tanpa tapis mempunyai ayunan tegangan pada keluaran selisih sebesar tegangan catunya. Dengan demikian, penguat kelas D tanpa tapis mempunyai rugi-rugi daya lebih kecil daripada penguat kelas D tradisional [3]. Karena tanpa tapis, maka penguat ini mempunyai keunggulan, yaitu dimensi rangkaian lebih kecil. Dalam arsitektur tanpa tapis, keluaran dari penguat terhubung langsung ke beban berupa penyuar, yang bertindak sebagai tapis yang akan memodulasi sinyal audionya [4]. Bagan kotak penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan kotak penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer*

Sinyal masukan V_i diumpangkan ke masukan pembanding atas dan juga ke masukan pembanding bawah setelah terlebih dahulu dibalik fasenya oleh pembalik fase. Masukan yang sefase maupun yang berlawanan fase masing-masing dibandingkan dengan isyarat segitiga. Keluaran kedua pembanding tersebut berupa aras *high* "1" atau *low* "0" dan kedua keluaran tersebut diumpangkan masing-masing ke masukan penguat daya atas dan penguat daya bawah untuk diperkuat dayanya. Keluaran kedua penguat daya dihubungkan oleh beban sehingga sinyal pada beban merupakan hasil selisih dari sinyal keluaran penguat daya atas dan sinyal keluaran penguat daya bawah. Gambar 2 menunjukkan bentuk sinyal keluaran bagan kotak penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer*.



Gambar 2. Bentuk sinyal keluaran bagan kotak penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer*

Sinyal masukan V_i berupa aras positif dan aras negatif yang diumpangkan ke masukan pembanding, yaitu V_i (biru) untuk masukan pembanding atas dan V_i' (merah) untuk masukan pembanding bawah yang telah dibalik fasanya. Kedua masukan dibandingkan dengan sinyal segitiga sehingga saat aras masukan lebih besar dari aras segitiga maka keluaran pembanding adalah aras *high* "1" dan sebaliknya saat aras masukan lebih kecil dari aras segitiga maka keluaran pembanding adalah aras *low* "0". Keluaran pembanding masing-masing diumpangkan ke masukan penguat daya sehingga bentuk sinyal pada keluaran pembanding atas adalah V_o (biru) dan pembanding bawah adalah $V_{o'}$ (merah). Sinyal pada beban yang merupakan hasil selisih dari kedua keluaran penguat daya adalah V_L (jingga).

2. Dasar Teori

Penelitian ini dilakukan pada perancangan penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer* berdasarkan teori-teori dan perhitungan-perhitungan elektronika. Tahapan yang dilakukan, yaitu menentukan bagan kotak sistem, menentukan rangkaian yang dibutuhkan, mengumpulkan dasar teori dan formula untuk perancangan, melakukan pengukuran, serta pengumpulan data dari pengukuran tersebut untuk dianalisis.

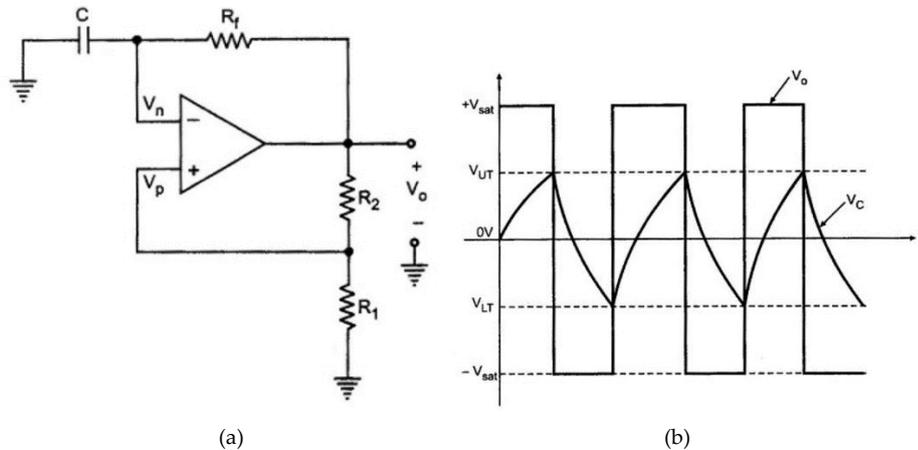
2.1. Pembangkit Gelombang Segitiga

Pembangkit gelombang segitiga terdiri dari untai pembangkit gelombang kotak dan untai *integrator*.

- Pembangkit gelombang kotak

Berikut adalah untai dasar pembangkit gelombang kotak yang ditunjukkan pada Gambar 3a dan bentuk gelombang pada kapasitor C dan keluaran tegangan V_o pada

Gambar 3b [5]. Dari persamaan (2), tampak bahwa frekuensi gelombang kotak yang dihasilkan ditentukan oleh nilai kapasitor C dan resistor R_f jika nilai $R_1 = R_2$.



Gambar 3. (a) Untai pembangkit gelombang kotak (b) Bentuk gelombang V_c dan V_o

Besarnya frekuensi yang dihasilkan oleh untai pembangkit gelombang kotak adalah:

$$f_o = \frac{1}{2R_f \cdot C \cdot \ln\left(\frac{+V_{sat} - V_{LT}}{+V_{sat} - V_{UT}}\right)} \quad (1)$$

di mana,

$$V_{UT} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (+V_{SAT})$$

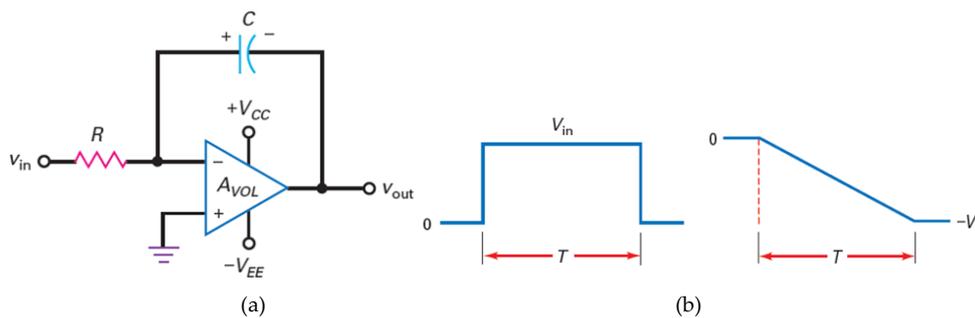
$$V_{LT} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-V_{SAT})$$

Jika nilai $R_1 = R_2$, maka diperoleh besarnya frekuensi osilasi [6]:

$$f_o = \frac{1}{2,1976 \cdot R_f \cdot C} \quad (2)$$

- Integrator

Berikut adalah untai dasar integrator yang ditunjukkan pada Gambar 4a dan bentuk gelombang tegangan masukan V_i berupa pulsa dan tegangan keluaran V_o berupa lereng ditunjukkan pada Gambar 4b [6].



Gambar 4. (a) Untai dasar *integrator* (b) Bentuk gelombang V_{in} dan V_{out}

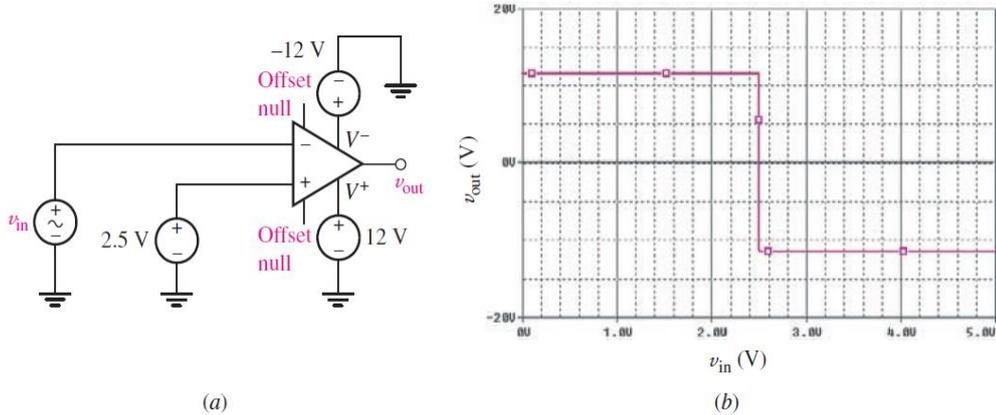
Hubungan besarnya tegangan keluaran dan tegangan masukan adalah:

$$V = \frac{T}{R \cdot C} \cdot V_{in} \quad (3)$$

2.2. Pembanding

Pembanding berfungsi untuk membandingkan dua buah aras sinyal, yaitu antara aras sinyal masukan dengan aras acuan [7]. Pembanding menggunakan penguat operasi yang

dioperasikan secara tak *linear*, yang akan membandingkan besar aras sinyal misalnya pada masukan membalik dengan aras acuan 2,5 V pada masukan tak membalik. Jika aras sinyal pada masukan membalik lebih kecil dari aras sinyal pada masukan tak membalik maka keluarannya akan berupa aras *high* dan jika aras sinyal pada masukan membalik lebih besar dari aras sinyal pada masukan tak membalik, maka keluarannya akan berupa aras *low*. Keluaran pembanding hanya berupa aras *high* atau *low*. Untai dasar pembanding dan bentuk gelombangnya dapat dilihat pada Gambar 5 di mana sinyal masukan pada V_{in} dan sebagai acuan adalah aras tegangan 2,5 V.



Gambar 5. (a) Untai pembanding (b) Bentuk gelombang keluaran

Yang harus diperhatikan pada penguat operasi sebagai pembanding adalah parameter *slew-rate*, yang menunjukkan maksimum laju perubahan tegangan pada keluarannya dan hal tersebut dinyatakan oleh persamaan berikut [8]:

$$SR = \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{max} \quad (4)$$

$$f_M = \frac{SR}{2\pi \cdot V_{omax}} \quad (5)$$

di mana,

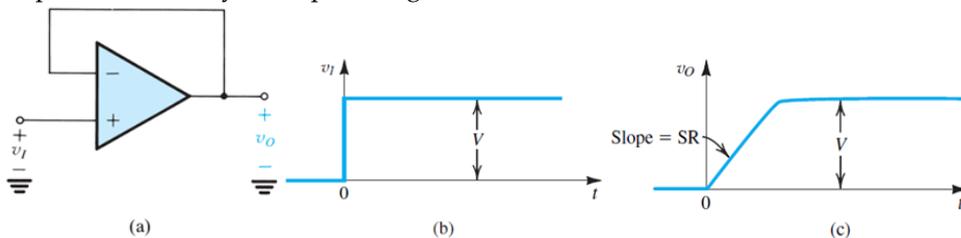
SR = *slew-rate*

dv_o = perubahan tegangan keluaran

dt = perubahan waktu

V_{omax} = tegangan keluaran maksimum

Gambar 6 menunjukkan penguat operasi yang diberi masukan V_i berupa undak dan sinyal pada keluarannya berupa lereng.

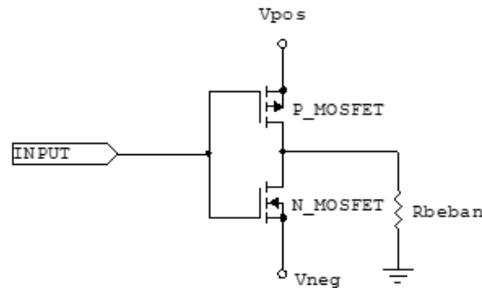


Gambar 6. (a) Penguat operasi (b) Masukan V_i undak (c) Keluaran V_o

2.3. Penguat Daya

Penguat daya berfungsi memperbesar daya di mana dalam hal ini yang diperbesar adalah tegangan atau arus atau keduanya. Pada penguat kelas D, komponen penguat daya

berupa sepasang MOSFET yang dioperasikan sebagai dorong tarik dan bekerja sebagai sakelar elektronik yang hanya mengenal keadaan *on* atau *off* saja. Pada keadaan *on* beda tegangan antara kaki *drain* dan *source* MOSFET kecil mendekati nol tetapi arus yang mengalir besar sesuai arus beban sehingga disipasi dayanya kecil mendekati nol. Pada keadaan *off* beda tegangan antara kaki *drain* dan *source* MOSFET besar mendekati tegangan catu tetapi arus yang mengalir kecil mendekati nol sehingga disipasi dayanya kecil mendekati nol. Dengan demikian, penguat daya kelas D mempunyai disipasi daya yang kecil. Penguat daya dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Penguat Daya

Besarnya daya keluaran penguat daya dinyatakan dengan persamaan berikut [9]:

$$P = I_{rms}^2 R = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (6)$$

di mana,

$$I_{rms} = I_m / \sqrt{2}$$

$$V_{rms} = V_m / \sqrt{2}$$

I_m = arus puncak sinusoida

V_m = tegangan puncak sinusoida

P = daya keluaran penguat

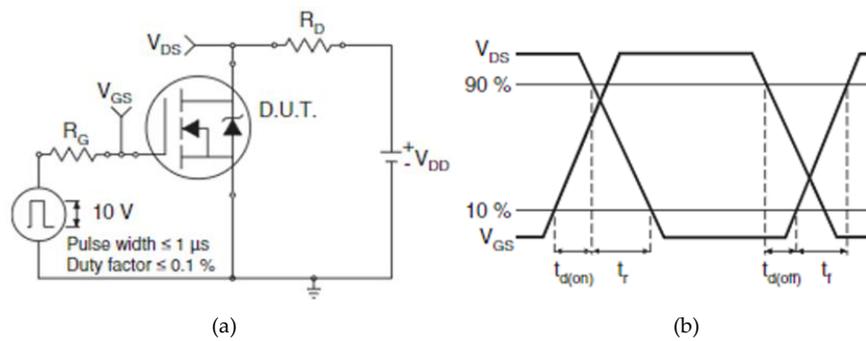
R = beban pada keluaran penguat

3. Perancangan

Penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer* mampu mempunyai tanggapan frekuensi di bawah 200 Hz dan mempunyai daya keluaran ± 35 W serta besar penguatan tegangan 15 kali. Frekuensi sinyal pembawa adalah 20 kHz pada beban 8 Ω . Nilai rata-rata dari sinyal digital berupa gelombang kotak pada keluaran penguat mewakili replika dari sinyal masukan yang diperkuat dengan penguatan sebesar tegangan catu dibagi tegangan puncak segitiga [10].

- Penguat daya

Penguat daya menggunakan sepasang MOSFET, yaitu IRF540 dan IRF9540 yang bekerja secara dorong tarik. Gambar 8a adalah N MOSFET IRF540 yang diberi picuan berupa pulsa dan Gambar 8b adalah bentuk gelombang pensaklarannya. Besar arus picu harus di atas 4 V agar MOSFET saturasi.



Gambar 8. (a) N MOSFET IRF540 [11] (b) Bentuk gelombang pensakelaran [11]

Daya keluaran penguat daya 35 W, maka sesuai dengan persamaan (5) besar catu 23,6 V. Dengan sistem penguat jembatan maka masing-masing penguat daya atas dan bawah harus menghasilkan keluaran berupa aras +12 V dan aras -12 V atau tegangan puncak ke puncak sebesar 24 V. Dengan asumsi adanya rugi daya maka tegangan catu N MOSFET IRF540 diberi tegangan catu +15 V dan untuk P MOSFET IRF9540 -15 V.

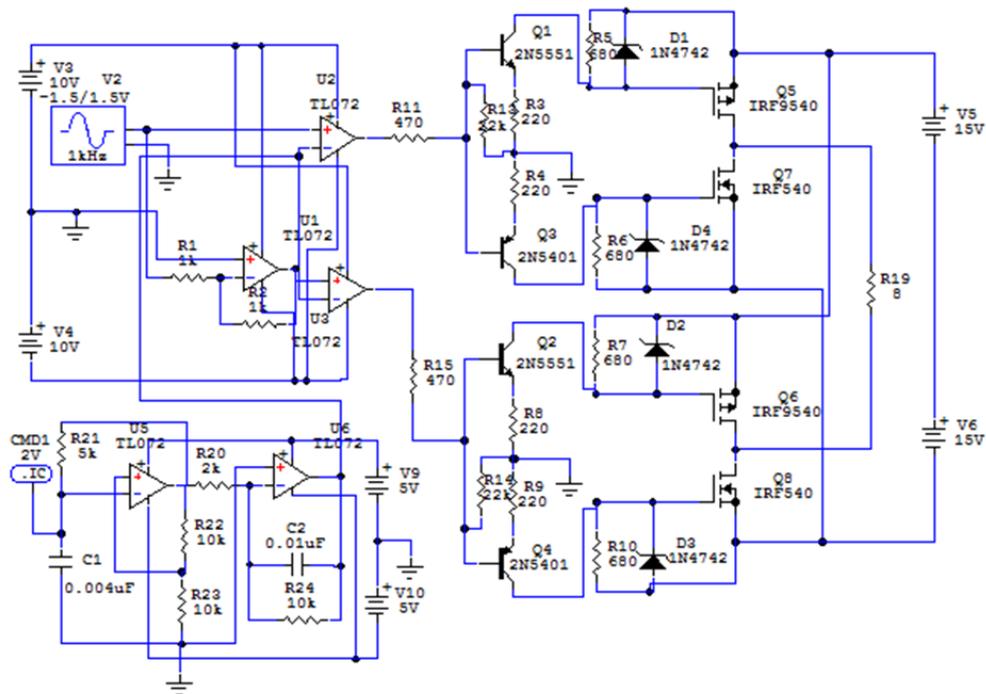
- **Pembangkit**
Pembangkit menggunakan penguat operasi TL072 yang diberi tegangan catu ± 10 V sehingga akan menghasilkan aras keluaran *high* +10 V dan *low* -10 V. Keluaran pembangkit ini dipergunakan untuk memicu MOSFET melalui transistor sebagai penguat arus.
- **Pembangkit gelombang segitiga**
Pembangkit gelombang segitiga terdiri dari untai pembangkit gelombang kotak dan untai *integrator* yang mempunyai frekuensi osilasi 20 KHz atau perioda 50 μ s. Agar frekuensi gelombang kotak yang dihasilkan pembangkit gelombang kotak dengan frekuensi 20 KHz dan *duty-cycle* 50%, maka sesuai dengan persamaan (2) untuk untai pembangkit gelombang kotak ditetapkan nilai hambatan $R_f = 5$ K dan nilai kapasitor $C = 0,004$ μ F. Indeks modulasi penguat kelas D dibatasi maksimal 0,8 agar beroperasi di daerah *linear* dan dihasilkan frekuensi yang stabil [12]. Penguatan tegangan dari penguat kelas D ini berupa penguat jembatan sebesar 15 kali, sehingga penguatan masing-masing penguat daya adalah sebesar 7,5 kali. Sesuai dengan perhitungan besar catu penguat daya ± 12 V maka dengan penguatan 7,5 kali, besar amplitudo gelombang segitiga adalah 1,6 V. Dengan pertimbangan indeks modulasi 0,8 maka amplitudo gelombang segitiga dirancang 2 V. Berdasarkan persamaan [3] untuk untai *integrator* diperoleh nilai hambatan $R = 2$ K dan nilai kapasitor $C = 0,01$ μ F.

4. Hasil Pengukuran

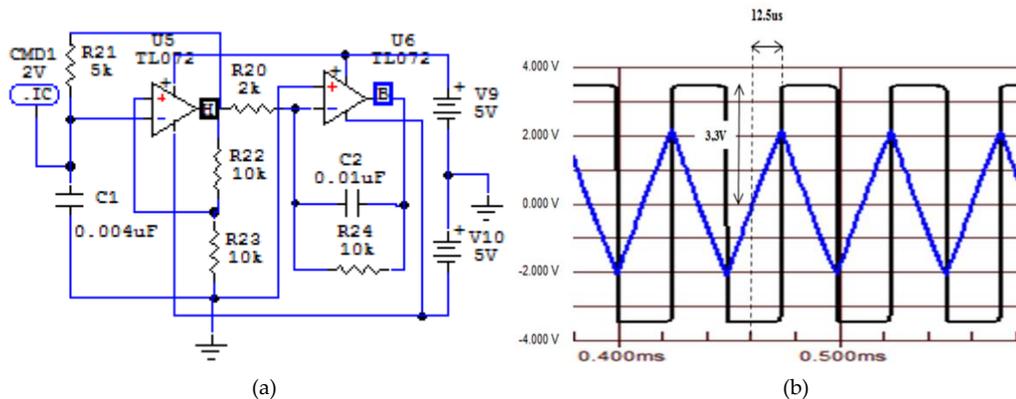
Gambar penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer* yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 9 di mana tiap-tiap bagian untai penyusunnya dilakukan pengukuran dengan simulator *Circuit Maker*.

4.1. Pembangkit Gelombang Segitiga

Pembangkit gelombang segitiga terdiri dari untai pembangkit gelombang kotak dan untai *integrator* seperti ditunjukkan pada Gambar 10a dan bentuk gelombang segitiga yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 10b.



Gambar 9. Untai penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer*



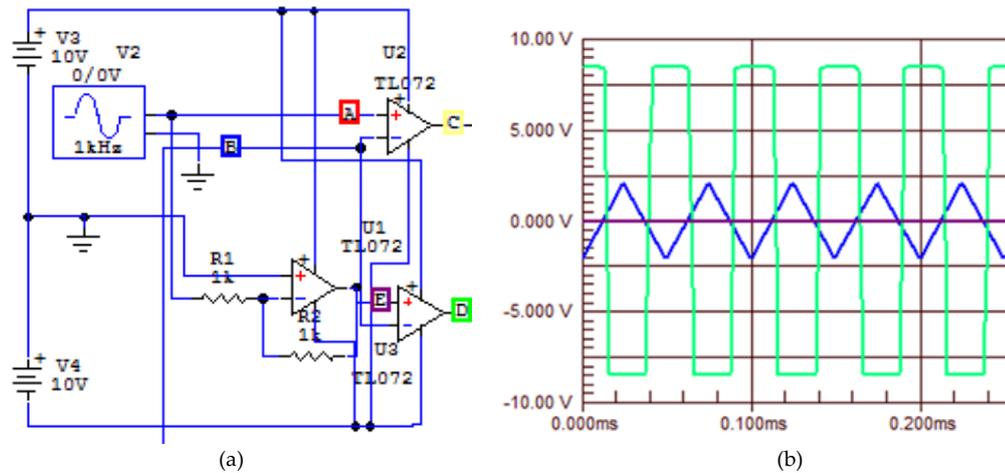
Gambar 10. (a) Untai pembangkit gelombang (b) Untai *integrator* segitiga

Untai pembangkit gelombang kotak menghasilkan gelombang kotak (hitam) yang mempunyai amplitudo 3,3 V dengan frekuensi 20 KHz dan *duty-cycle* 50%. Untai *integrator* menghasilkan gelombang segitiga (biru) dengan besar tegangan puncak 2 V dan jika dihitung dengan persamaan (3) di mana V_i dan $T/4 = 12,5 \mu s$ dihasilkan tegangan puncak segitiga = 2,06 V.

4.2. Pemanding

Untai pemanding pada Gambar 11a yang terdiri dari dua buah pemanding masing-masing menggunakan cepis TL072 di mana pemanding atas membandingkan sinyal masukan (merah) dengan gelombang segitiga (biru) dan pemanding bawah membandingkan sinyal masukan yang telah dibalik fasanya (ungu) dengan gelombang segitiga (biru). Dalam hal ini masukan diberi tegangan 0 V sehingga pada Gambar 11b tampak sinyal masukan (merah) dan sinyal masukan yang dibalik fasanya (ungu) saling

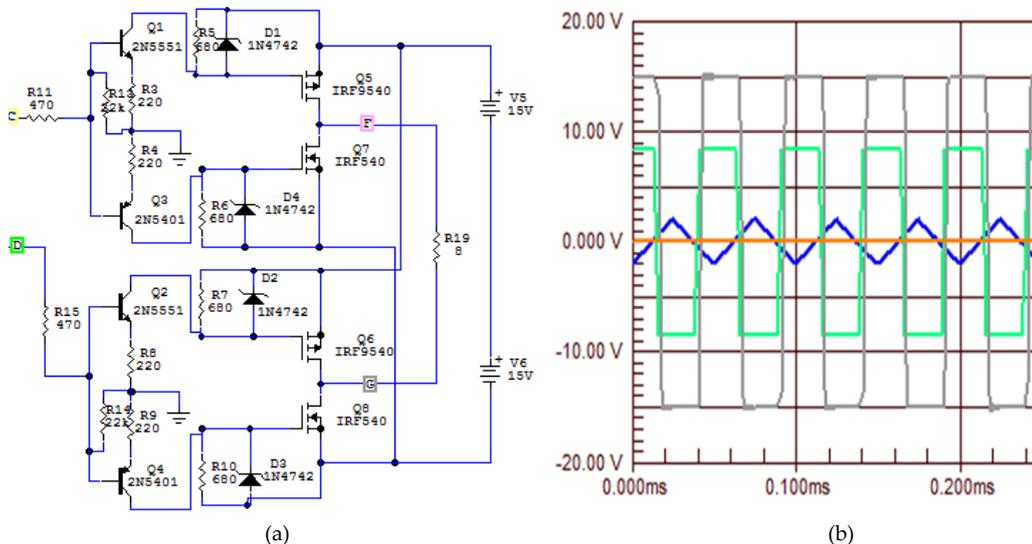
berhimpit pada aras 0 V. Keluaran pembeding atas (kuning) dan pembeding bawah (hijau) saling berhimpit berupa gelombang kotak dengan amplitudo 8,5 V.



Gambar 11. (a) Untai pembeding (b) Bentuk keluaran pembeding

4.3. Penguat Daya

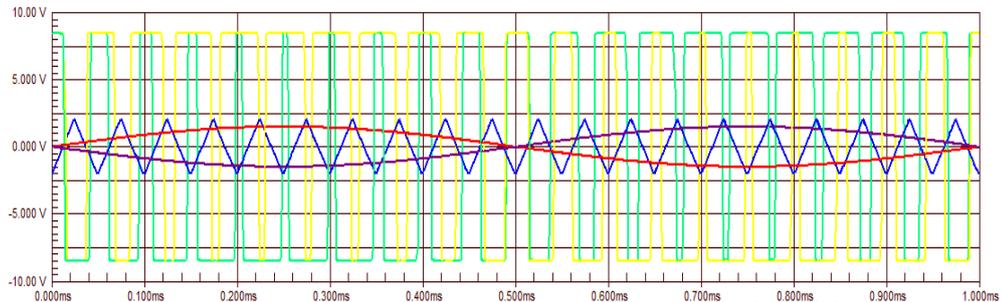
Untai penguat daya pada Gambar 12a terdiri dari penguat daya atas dan penguat daya bawah, masing-masing diberi umpan dari keluaran untai pembeding atas (kuning) dan untai pembeding bawah (hijau) yang saling berhimpit menghasilkan keluaran penguat daya atas (*pink*) dan penguat daya bawah (kelabu) berupa gelombang kotak yang saling berhimpit dengan amplitudo 15 V yang ditunjukkan pada Gambar 12b. Tegangan pada beban merupakan selisih kedua keluaran penguat daya tersebut adalah 0 V (*orange*). Dalam hal ini besar sinyal masukan adalah 0 V.



Gambar 12. (a) Untai penguat daya (b) Keluaran penguat daya

Jika masukan penguat berupa gelombang sinusoida dengan amplitudo 1,5 V dan frekuensi 1 KHz, maka bentuk gelombang pada untai pembeding ditunjukkan pada Gambar 13 di mana sinyal masukan (merah) masuk ke pembeding atas menghasilkan keluaran gelombang kotak (kuning) dan sinyal masukan yang sudah dibalik fasanya (ungu) masuk

ke pembanding bawah menghasilkan keluaran gelombang kotak (hijau). Masing-masing pembanding dibandingkan dengan gelombang segitiga (biru). Besar amplitudo gelombang kotak 8,5 V.

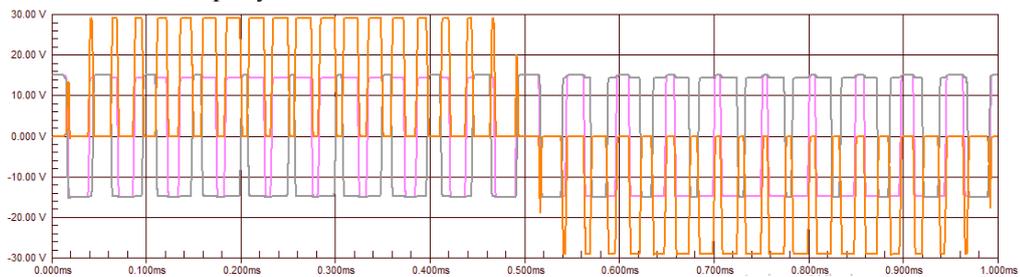


Gambar 13. Bentuk gelombang untai pembanding ($V_{in} = 1,5\sin 2\pi 1000t$)

Bentuk gelombang pada penguat daya ditunjukkan pada Gambar 14, di mana keluaran penguat daya atas berupa gelombang kotak (kelabu) dan keluaran penguat daya bawah berupa gelombang kotak (pink) dengan besar amplitudo ≈ 15 V. Keluaran penguat daya pada beban merupakan selisih keluaran penguat daya atas dan bawah (orange) dengan besar amplitudo = 29,7 V. Dengan demikian sesuai persamaan (6), penguat mampu menghasilkan daya gelombang sinus = 55 W pada indeks modulasi 1.

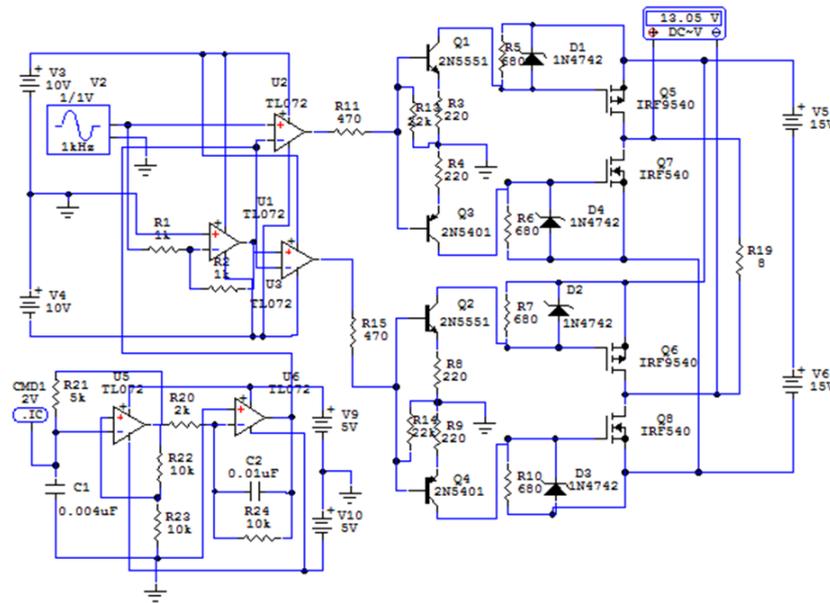
Pada gambar tersebut tampak keluaran penguat kelas D tanpa tapis terdiri dari tiga aras (orange), yaitu aras +30 V, 0, dan -30 V. Pensaklaran tiga aras memungkinkan untuk menghilangkan tapis, sehingga membantu untuk mengurangi biaya sistem. Selain itu, pensaklaran tiga aras mempunyai gangguan elektromagnetik yang lebih sedikit dan efisiensi daya yang lebih baik daripada penguat kelas D tradisional [13].

Penguat kelas D tradisional mengasilkan keluaran PWM yang terdiri dari pulsa-pulsa dengan dua aras, yaitu aras *high* "1" dan *low* "0" dengan lebar pulsa sebanding dengan aras sinyal masukan [14]. Keluaran dengan dua aras memerlukan tapis pelewat frekuensi rendah sebelum ke penyuar.

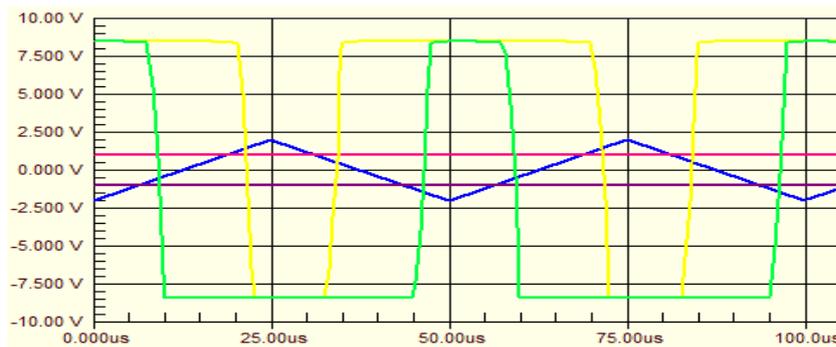


Gambar 14. Bentuk gelombang penguat daya ($V_{in} = 1,5\sin 2\pi 1000t$)

Untuk pengukuran penguatan tegangan penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer* diberi sumber tegangan DC = 1 V pada masukannya dan pada bebannya di keluarannya diberi meter pengukur tegangan yang menunjukkan besar tegangan = 13,05 V dapat dilihat pada Gambar 15 dan bentuk gelombang pada untai pembanding, ditunjukkan pada Gambar 16 di mana masukan pembanding atas berupa aras +1 V (merah) menghasilkan keluaran gelombang kotak (kuning) dan masukan pembanding bawah berupa aras -1 (ungu) menghasilkan keluaran gelombang kotak (hijau). Amplitudo gelombang kotak = 8,5 V. Hasil ini menunjukkan penguat mampu menanggapi sinyal dengan frekuensi yang sangat rendah hingga DC.

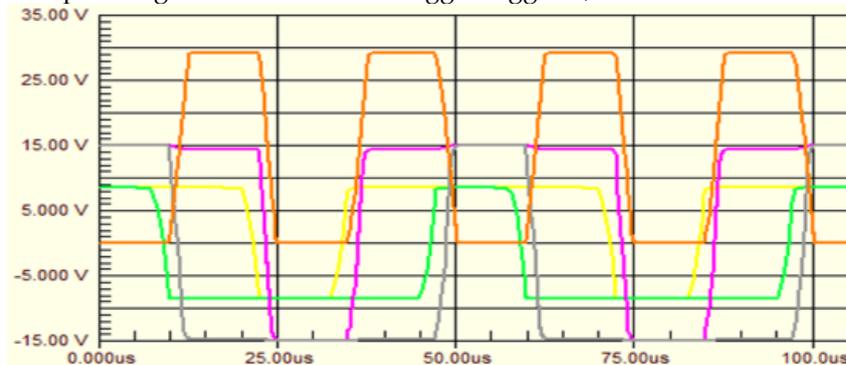


Gambar 15. Pengukuran penguatan tegangan penguat



Gambar 16. Bentuk gelombang untai pembanding ($V_{in} = 1\text{ V}$)

Keluaran penguat daya ditunjukkan pada Gambar 17 di mana keluaran penguat daya atas (ungu) dan keluaran penguat daya bawah (kelabu) berupa gelombang kotak dengan amplitudo $\approx 15\text{ V}$. Keluaran penguat daya pada beban merupakan selisih keluaran penguat daya atas dan bawah (*orange*) dengan besar amplitudo = $29,7\text{ V}$. Dari hasil pengukuran tersebut menunjukkan $\text{slew-rate} = 29,5\text{ V}/5\text{ }\mu\text{s}$ sehingga berdasarkan persamaan (5), penguat mampu menghasilkan frekuensi tinggi hingga $31,8\text{ KHz}$.



Gambar 17. Bentuk gelombang penguat daya ($V_{in} = 1\text{ V}$)

Hasil pengukuran penguatan tegangan dengan beberapa variasi besaran masukan dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Pengukuran penguatan tegangan

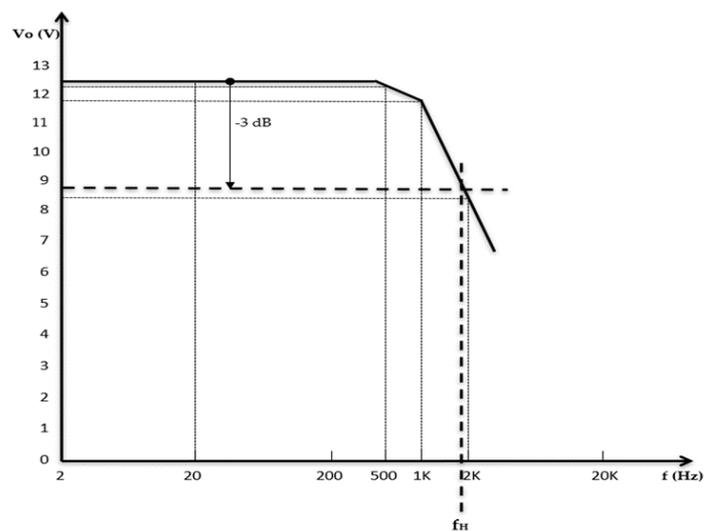
Tegangan masukan (V)	Tegangan keluaran (V)	Penguatan tegangan (kali)	Daya (W)
0,1	1,193	12	0,09
1	13,05	13,1	16,6
1,6	21,32	13,3	28,4
1,7	23,99	14,1	35,9
2	29,72	14,9	55,2

Tegangan masukan maksimal tidak boleh lebih besar dari tegangan puncak gelombang segitiga, yaitu sebesar 2 V. Dari Tabel 1 tampak saat tegangan masukan maksimal akan dihasilkan daya keluaran maksimal 55,2 W. Untuk menjaga agar penguat bekerja di daerah *linear*, maka penguat tidak dirancang dengan besar tegangan masukan yang maksimal. Berdasarkan perancangan daya keluaran penguat sebesar 35 W telah terpenuhi dengan besar tegangan masukan 1,7 V.

Hasil pengukuran tegangan keluaran V_o penguat dengan tegangan masukan V_i efektif sebesar 1 V dan beberapa variasi besaran frekuensi dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil pengukuran V_o dengan tegangan efektif $V_i = 1$ V

Frekuensi V_i (Hz)	Tegangan keluaran V_o (V)
≤ 20	12,5
50	12,5
100	12,5
200	12,5
500	12,4
1K	11,9
2K	8,4



Gambar 18. Tanggapan frekuensi penguat

Dari hasil pengukuran pada Tabel 2 dapat dibuat tanggapan frekuensi penguat seperti pada Gambar 18. Berdasarkan hasil pengujian dengan masukan DC dengan frekuensi = 0 Hz dan pengukuran *slew-rate* pada Gambar 15 dan 16 membuktikan tanggapan frekuensi

penguat dari 0 Hz hingga 31,8 KHz. Karena frekuensi gelombang segitiga dirancang sebesar 20 KHz, maka frekuensi penggal atas penguat akan terbatas tidak akan melebihi frekuensi 20 KHz. Dari Gambar 18 diperoleh besar frekuensi penggal atas penguat $f_H = 1,8$ KHz. Dengan demikian tanggapan frekuensi penguat dari 0 hingga 1,8 KHz dan hal ini memenuhi hasil rancangan penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer* dengan tanggapan frekuensi 20 Hz-200 Hz.

5. Kesimpulan

Keluaran penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer* berupa sinyal digital gelombang kotak dengan *duty-cycle* yang berubah-ubah di mana rerata tegangannya merupakan replika dari sinyal analog. Penguatan tegangan penguat kelas D tanpa tapis untuk *subwoofer* ini tidak tetap untuk sinyal masukan yang berbeda besarnya dan penguatan tegangan akan mengecil untuk sinyal masukan yang kecil karena adanya *slew-rate* dari gelombang kotak atau pulsa yang tidak ideal. Pengaruh *slew-rate* makin berpengaruh untuk lebar pulsa yang semakin sempit.

Daftar Pustaka

- [1] Sound Storm Laboratories SSL, *Glossary* [Online], <https://soundstormlab.com/product-info/glossary/>, diakses tanggal 7 Juni 2022.
- [2] Self, Douglas, 2009, "Audio power amplifier design handbook," edisi ke-5, Elsevier Ltd, USA, hal. 371.
- [3] EDN, Filterless Class D simplifies audio amplifier design [Online], <https://www.edn.com/filterless-class-d-simplifies-audio-amplifier-design/>, diakses tanggal 1 Juni 2022.
- [4] M.A. Teplechuk, A. Gribben, and C. Amadi, "True filterless class-D audio amplifier," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 46, no. 12, 2011.
- [5] Online Electrical and Electronics Study, *Square wave generator using Op amp*, Copyright © 2014 to 2022 eeeguide.com all rights reserved [Online], <https://www.eeeguide.com/square-wave-generator-using-op-amp/>, diakses tanggal 7 Juni 2022.
- [6] Albert Malvino, David J. Bates, "Electronic principles," McGraw-Hill Education, 8th edition, h. 871, 2016.
- [7] William H. Hayt, Jr., Jack E. Kemmerly and Steven M. Durbin, "Engineering circuit analysis," McGraw-Hill Companies, Inc., 8th edition, h. 203, 2012.
- [8] Adel S. Sedra and Kenneth C. Smith, "Microelectronic circuits," Oxford University Press, 7th edition, h. 112-115, 2015.
- [9] Charles K. Alexander, Matthew N. O. Sadiku, "Fundamentals of electric circuits," McGraw-Hill Companies, Inc., 5th edition, h. 469, 2013.
- [10] S. Krit, H. Amrani, H. Qjidaa, H. Cordonnier, "Class D audio amplifier design theory and design implementation for portable applications," *IEEE*, 2007.
- [11] Vishay Siliconix [Online] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/250771/VISHAY/IRF540.html>, diakses tanggal 7 Juni 2022.
- [12] DTU Library, Nielsen, Dennis; Knott, Arnold; Pfaffinger, Gerhard; Andersen, Michael A. E., "Investigation of switching frequency variations and EMI properties in self-oscillating class D amplifiers" [Online], <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/90233740/prod11396112295395.paper37i.pdf>, diakses tanggal 2 Juli 2022.

- [13] K. Sunwoo et al., "A 0.028% THD + N, 91% power-efficiency, 3-level PWM class-D amplifier with a true differential front-end," *IEEE ISSCC Dig. Tech. Papers*, h. 96-98, 2012.
- [14] Y. Choi, W. Tak, Y. Yoon, J. Roh, S. Kwon, J. Koh, "A 0.018% THD + N, 88-dB PSRR PWM class-D amplifier for direct battery hookup," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 47, h. 454-463, 2012.